

0 778622

На правах рукописи



Князева Мария Александровна

**НОЧНАЯ F2-ОБЛАСТЬ ИОНОСФЕРЫ И ПЛАЗМОСФЕРА ЗЕМЛИ:
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Мурманск – 2009

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Федерального агентства по рыболовству «Мурманский государственный технический университет» (ФГОУВПО «МГТУ», г. Мурманск)

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор
НАМГАЛАДЗЕ Александр Андреевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
МИХАЙЛОВ Андрей Валерьевич

кандидат физико-математических наук, доцент
СУРОТКИН Владимир Андреевич

Ведущая организация:

Учреждение Российской академии наук Полярный геофизический институт Кольского научного центра РАН (ПГИ КНЦ РАН, г. Мурманск)

Защита диссертации состоится 29 сентября 2009 г. в 11 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.237.01 при Учреждении Российской академии наук Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН по адресу: 142190 г. Троицк, Московская обл., ИЗМИРАН

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЗМИРАН

Автореферат разослан "09" июля 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.237.01
доктор физ.-мат. наук

Ю.М. Михайлов
Михайлов Ю.М.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000549199

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Одним из приоритетных направлений в современной геофизике является прогнозирование космической погоды, позволяющее на основе фундаментальных знаний о процессах, протекающих в верхней атмосфере Земли, предсказывать количественные и качественные изменения в ней в зависимости от гелио-геофизических условий. Для адекватного прогнозирования состояния верхней атмосферы Земли необходимо исследовать особенности термосферно-ионосферно-магнитосферного взаимодействия.

Важным методом исследования и интерпретации экспериментальных данных в последнее время стал метод математического моделирования с использованием численных моделей, позволяющий описывать это взаимодействие, в той или иной степени полноты и адекватности (в зависимости от модели).

Несмотря на многолетние экспериментальные и теоретические исследования явлений и процессов, описываемых в терминах термосферно-ионосферно-магнитосферного взаимодействия, многие стороны этого взаимодействия остаются до конца не выясненными. Одной из таких сторон является проблема *ночных областей повышенной электронной концентрации (ОПЭК)* в F2-области среднеширотной ионосферы и в плазмосфере Земли, не имевшая до сих пор однозначного физического толкования.

Ночные ОПЭК в F2-области среднеширотной ионосферы проявляются в виде максимумов в суточных и широтных вариациях критической частоты F2-слоя (f_oF2), максимальной электронной концентрации ($NmF2$) F2-области ионосферы и полного электронного содержания в столбе единичного сечения (TEC – Total Electron Content). Наблюдались эти повышения во все сезоны (чаще зимой) преимущественно при спокойных геомагнитных условиях и обнаруживались практически всеми основными методами ионосферных измерений.

Наряду с явлением ОПЭК в F2-области среднеширотной ионосферы аналогичные повышения концентрации плазмы имеют место и в ночной плазмосфере Земли. Во все сезоны при различных уровнях солнечной активности профили зависимости ионных концентрации от L -параметра (L – параметр Мак-Илвейна, геоцентрическое расстояние до вершины геомагнитной силовой линии, выраженное в земных радиусах) имеют вблизи плазмопаузы слабо изученные особенности, которые можно охарактеризовать как «структурированную» плазмопаузу. Обнаруживались они с помощью наземных наблюдений свистящих атмосфериков и спутниковых измерений.

До настоящего момента времени измерения, охватывающие одновременно ОПЭК в F2-области ионосферы и в плазмосфере Земли не проводились, а эти два вида повышений не сопоставлялись между собой.

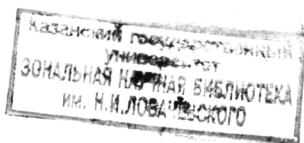
Предлагавшиеся объяснения формирования ОПЭК в основном связывают с переносом замагниченной плазмы посредством нейтрального ветра и электрического поля. Эти интерпретации имели преимущественно качественный характер, либо основывались на результатах, полученных с использованием одномерных математических моделей. Но процессы переноса плазмы в совокупности являются существенно трехмерными, и с развитием компьютерных технологий актуальным стал переход к трехмерному моделированию взаимосвязанных процессов, ответственных за формирование ОПЭК.

Целью диссертационной работы является трехмерное математическое моделирование областей ОПЭК и изучение на его основе:

- пространственной структуры (широтных, долготных и высотных вариаций этих областей) и механизма формирования ночных областей повышенной электронной концентрации в F2-области среднеширотной ионосферы и в плазмосфере Земли;
- вариаций этих областей в зависимости от сезона, моментов мирового и местного времени, солнечной и геомагнитной активности.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- 1) провести модельные расчеты глобальных трехмерных распределений электронной концентрации при различных гео- и гелиофизических условиях с использованием теоретической модели UAM и эмпирической модели ионосферы IRI-2001 и изучить на их основе пространственную структуру ОПЭК;
- 2) выявить вариации пространственных характеристик ОПЭК в зависимости от местного и мирового времени, сезонов, солнечной и геомагнитной активности;
- 3) провести модельные расчеты глобального распределения электронной концентрации с учетом и без учета ветрового увлечения и электромагнитного дрейфа плазмы;
- 4) определить на основе этих расчетов механизм формирования ночных ОПЭК в F2-области среднеширотной ионосферы и в плазмосфере Земли;
- 5) объяснить вариации ОПЭК на основе установленного механизма их формирования.



Метод исследования. Для исследования проблемы ночных ОПЭК в F2-области среднеширотной ионосферы и в плазмосфере Земли применялся метод математического моделирования с использованием глобальной, трехмерной, нестационарной численной модели верхней атмосферы Земли (UAM – Upper Atmosphere Model), описывающей термосферу, ионосферу, плазмосферу и внутреннюю магнитосферу Земли как единую систему. Модель охватывает диапазон высот от 60 км до $15R_E$ (R_E – радиус Земли) геоцентрического расстояния и учитывает несовпадение геомагнитного и географического полюсов Земли. В модели UAM рассчитываются концентрации основных нейтральных и заряженных компонент атмосферы, температуры и скорости движения нейтрального, ионного и электронного газов, а также электрическое поле магнитосферного и термосферного происхождения путем численного интегрирования системы квазигидродинамических уравнений, описывающих законы сохранения частиц, импульса и энергии (уравнения непрерывности, движения и теплового баланса) и уравнения для потенциала электрического поля.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов диссертационной работы определяются корректностью постановки задач, метода их решения и согласием результатов численного моделирования с аналогичными результатами, полученными по эмпирической модели ионосферы IRI-2001.

Научная новизна настоящей диссертационной работы заключается в следующем.

1. Впервые описана пространственная структура ночных областей повышенной электронной концентрации (ОПЭК) с использованием как теоретической (UAM), так и эмпирической модели ионосферы (IRI-2001) в различных гелиогеофизических условиях (разные сезоны и уровни солнечной активности).
2. Установлен механизм формирования ночных ОПЭК и впервые выявлены особенности влияния процессов переноса ионосферно-плазмосферной плазмы, обусловленные их трехмерностью.
3. Впервые объяснены вариации ночных ОПЭК в зависимости от сезонов, моментов местного и мирового времени, солнечной и геомагнитной активности.

Научная и практическая значимость работы.

Результаты проведенных исследований важны для понимания сложных

взаимосвязанных процессов в системе термосфера-ионосфера-плазмосфера и представляют интерес с точки зрения изучения структуры и динамики ионосферы и плазмосферы Земли. Установление пространственной структуры и механизма формирования ночных ОПЭК в F2-области среднеширотной ионосферы и в плазмосфере Земли позволяет корректировать характеристики распространения радиоволн через ночную ионосферу и правильно интерпретировать спутниковые данные.

Практическую ценность имеют полученные результаты и для развития самого метода математического моделирования, а именно их можно использовать для тестирования других теоретических моделей в части адекватного воспроизведения поведения ночной F2-области ионосферы и плазмосферы Земли.

Результаты исследования могут найти применение в задачах космической навигации, радиолокации и связи, в учебных курсах и пособиях к ним по физике плазмы и космической геофизике.

На защиту выносятся:

- 1) Описание пространственной структуры ночных областей повышенной электронной концентрации (ОПЭК) в F2-области среднеширотной ионосферы и плазмосфере Земли, полученное на основе анализа результатов наблюдений и численного моделирования. Выявлено существование двух типов ОПЭК в широтно-долготном распределении максимальной электронной концентрации в F2-области ионосферы ($NmF2$): *зимнего* с максимумами в широтной и суточной вариациях $NmF2$ и *летнего* с максимумом только в широтной вариации. ОПЭК обоих типов простираются вдоль силовых линий геомагнитного поля в плазмосферу Земли.
- 2) Механизм формирования ОПЭК, основанный на влиянии широтно-неоднородных потоков плазмы из плазмосферы и ветровом увлечении ионосферной плазмы термосферным ветром.
- 3) Объяснения наблюдаемых сезонных и в цикле солнечной активности вариаций ОПЭК на высотах F2-области ионосферы.

Личный вклад автора. Автор участвовала в постановке задач, провела теоретические расчеты с использованием модели UAM (во всех ее версиях), разработала методику расчета глобальных распределений максимальной концентрации электронов в F2-области ионосферы по данным IRI-2001. Ею были проведены обработка, анализ и сопоставление результатов модельных расчетов ме-

жду собой. Автор диссертации принимала участие в обсуждении и подготовке публикаций полученных результатов, вошедших в диссертационную работу.

Апробация работы и публикации. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих Российских и международных конференциях: Всероссийской научно-технической конференции "Наука и образование-2003" (Мурманск, 2003); Международных научно-технических конференциях "Наука и образование" (Мурманск 2004, 2005, 2006, 2008, 2009); XXVI–XXIX, XXXI и XXXII семинарах «Physics of Auroral Phenomena» (Апатиты 2003, 2004, 2005, 2006, 2008, 2009); European Geosciences Union General Assembly 2006 (Vienna, Austria, 2006); 6th и 7th International Conference "Problems of Geocosmos" (Санкт-Петербург 2006, 2008); IUGG XXIV General Assembly (Perugia, Italy, 2007).

Материалы диссертации были доложены и обсуждены на рабочем семинаре в КНЦ ПГИ РАН (г. Апатиты, Мурманская обл.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 28 работы, из них 1 статья в журнале из перечня ВАК, 15 работ в трудах научных конференций и 12 тезисов докладов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения. Работа содержит 105 страницы текста, в том числе 23 рисунка и 1 таблица. Список цитируемой литературы содержит 139 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обосновывается актуальность темы исследования, сформулирована цель работы, приводятся сведения о научной новизне и практической значимости полученных результатов, кратко изложены структура и содержание диссертации.

В **первой главе** представлен обзор опубликованных работ по экспериментальным и теоретическим исследованиям ночных повышений концентрации плазмы в F2-области среднеширотной ионосферы и в плазмосфере Земли.

На основе обобщения и систематизации экспериментальных данных по этим повышениям сделаны выводы, что: 1) ночные повышения $NmF2$ и TEC (в

1,2+8 раз) и концентрации плазмы в плазмосфере (в 1,3+5 раз) обнаруживались практически всеми основными методами ионосферных и плазмосферных измерений; 2) наиболее часто и с большей амплитудой эти повышения наблюдались в зимних невозмущенных условиях при низкой солнечной активности.

Наиболее часто привлекаемыми механизмами формирования ночных повышений $NmF2$ и TEC являются а) подъем нейтральным ветром плазмы вверх, в область более низких скоростей ее химических потерь, и б) перенос плазмы западным электрическим полем в силовые трубки геомагнитного поля меньшего объема. Однако в последнем механизме не учитывается, что: 1) при переносе западным полем на более низкие широты, плазма переносится вниз, в область более высоких скоростей ее химических потерь; 2) усиления такого поля не имеют четкого обоснования.

Использование одномерного математического моделирования для исследования процесса формирования ночных повышений $NmF2$ и TEC (т.е. система квазигидродинамических уравнений для заряженных компонент ионосферы интегрировались либо по вертикали, либо вдоль выбранной силовой линии геомагнитного поля) является некорректным. Процессы переноса ионосферной плазмы являются существенно трехмерными и необходимо решать трехмерную систему уравнений, описывающих поведение заряженных частиц на высотах F2-области ионосферы и плазмосферы Земли, вдоль всей совокупности замкнутых силовых линий геомагнитного поля.

Во **второй главе** дано описание глобальной нестационарной численной модели верхней атмосферы Земли (UAM – Upper Atmosphere Model), используемой для расчетов глобальных распределений электронной концентрации. Модель описывает термосферу, ионосферу и плазмосферу как единую систему, охватывая диапазон высот от 60–80 км до геоцентрического расстояния в $15R_E$ (R_E – радиус Земли), и учитывает несовпадение геомагнитного и географического полюсов Земли. В ней численно интегрируются методом конечных разностей уравнения вида:

$$\partial n_\alpha / \partial t + \nabla (n_\alpha V_\alpha) = Q_\alpha - L_\alpha, \quad (1)$$

$$\rho_\alpha [dV_\alpha / dt + \Omega \times (\Omega \times r) + 2 \cdot \Omega \times V_\alpha] = F_\alpha, \quad (2)$$

$$\rho_\alpha c_{va} dT_\alpha / dt + p_\alpha \nabla V_\alpha = \nabla (\lambda_\alpha \nabla T_\alpha) + P_{Q\alpha} - P_{L\alpha} + P_{T\alpha}, \quad (3)$$

совместно с уравнением для потенциала электрического поля φ :

$$\nabla [\sigma (\nabla \varphi - V \times B) - j_m] = 0, \quad (4)$$

где нижние индексы $\alpha=n, i, e$ обозначают нейтральный, ионный и электронный газы, соответственно; n_α и ρ_α – концентрация частиц и массовая плотность α -

газа; V_α – направленная макроскопическая скорость α -газа относительно вращающейся Земли; Q_α и L_α – скорости образования и потерь частиц α -газа за счет фотохимических процессов, соответственно; Ω – вектор угловой скорости вращения Земли; r – радиус-вектор от центра Земли; F_α – результирующая сила, действующая на единицу объема α -газа; c_{va} , λ_α , T_α и p_α – удельная теплоемкость при постоянном объеме, теплопроводность, температура и давление α -газа, соответственно; $P_{Q\alpha}$ и $P_{L\alpha}$ – скорость нагрева и охлаждения α -газа, соответственно; $P_{T\alpha}$ – теплообмен между α -газом и другими газами; $\hat{\sigma}$ – тензор ионосферной проводимости; V – скорость среднемассового движения нейтрального газа; j_m – плотность магнитосферного тока.

Модель UAM состоит из 4-х блоков: 1) блок нейтральной атмосферы и нижней ионосферы (диапазон высот от 60–80 км до 520 км); 2) блок F2-области ионосферы и плазмосферы (от 175 км до геоцентрического расстояния в $15R_E$); 3) блок расчета электрического поля; 4) магнитосферный блок. В блоке 1 используется сферическая геомагнитная система координат, в блоке 2 – магнитная дипольная система координат.

В уравнениях (1)–(3) учитываются фотодиссоциация нейтральных кислородных компонент, фотоионизация прямым и рассеянным солнечным излучением, вторичная и корпускулярная ионизация нейтральных частиц, ионно-молекулярные реакции, диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов, зарядо-обменные реакции и процессы переноса (амбиполярная диффузия, ветровое увлечение, ион-ионное трение и электромагнитный дрейф) для атомарных ионов, молекулярная и турбулентная диффузии, нейтрал-ионное и вязкое трения, нагрев солнечным излучением и выпадающими из магнитосферы энергичными электронами, теплопроводность, Джоулев нагрев, нагрев нейтрального газа за счет химических реакций и охлаждение за счет излучения. Учет эффектов трехмерности переноса замагниченных атомарных ионов осуществляется путем использования лагранжевого подхода применительно к движениям плазмы вдоль траектории электромагнитного дрейфа.

Для вычисления части параметров нейтральной атмосферы могут быть использованы эмпирические модели термосферы NRLMSISE-00, горизонтальных термосферных ветров HWM-93, для ионосферы и плазмосферы – модель ионосферы IRI-2001.

Входными параметрами являются: дата и момент времени UT начала расчета события; спектры солнечного ультрафиолетового (УФ) и крайнего ультра-

фиолетового (КУФ) излучения, зависящие от солнечной активности; потоки выпадающих из магнитосферы энергичных электронов; продольные токи, связывающие ионосферу с магнитосферой, или распределение потенциала электрического поля на границе полярной шапки; индексы геомагнитной активности.

В проводившихся численных экспериментах шаги интегрирования по высоте менялись от 3 км на высотах ниже 100 км до 30 км на высотах около 400 км и далее нарастали в геометрической прогрессии, по геомагнитной долготе – были постоянными и равными 15° , по геомагнитной широте – переменными: наибольшие шаги (5°) в окрестностях экватора, наименьшие (2°) в окрестностях авроральной зоны. Шаги интегрирования по времени были постоянными и равнялись 1 или 2 минутам.

Граничные условия формулируются из физических предположений или экспериментальных данных.

В качестве начальных условий для спокойных периодов используются квазистационарные решения уравнений (1)–(4), полученные в ходе многократных расчетов параметров верхней атмосферы для одних и тех же суток; для возмущенных – результаты расчетов для предыдущих спокойных суток. Альтернативный способ – использование соответствующих эмпирических моделей (MSISE, HWM и IRI).

В **третьей главе** представлены результаты исследований пространственной структуры ночных ОПЭК и их вариаций в зависимости от различных гелиогеофизических условий по данным наблюдений (по эмпирической модели ионосферы IRI) и теоретического моделирования (по самосогласованной версии модели UAM, далее UAM-TT) для восьми дат, характеризующих различные сезоны при разных уровнях солнечной активности.

На основе анализа полученных широтно-долготных распределений $NmF2$ установлено, что существуют два типа ОПЭК (рис. 1). В летнем полушарии изолинии ОПЭК представляют собой *«хребет с понижающейся вершиной»* (значения $NmF2$ монотонно убывают при переходе от вечерних часов к утренним), в зимнем – изолинии ОПЭК представляют собой *«холмы»* (имеются максимумы значений $NmF2$, вокруг которых замыкаются изолинии электронной концентрации). Зимний ОПЭК проявляется в виде максимумов в широтной и в суточной вариациях $NmF2$, летний – в виде максимума только в широтной вариации. В широтных вариациях амплитуды повышений $NmF2$ в ОПЭК зимой выше. В суточных вариациях амплитуды повышений меньше, чем в широтных.

Анализ аналогичных карт для других дат и моментов UT показывает, что в

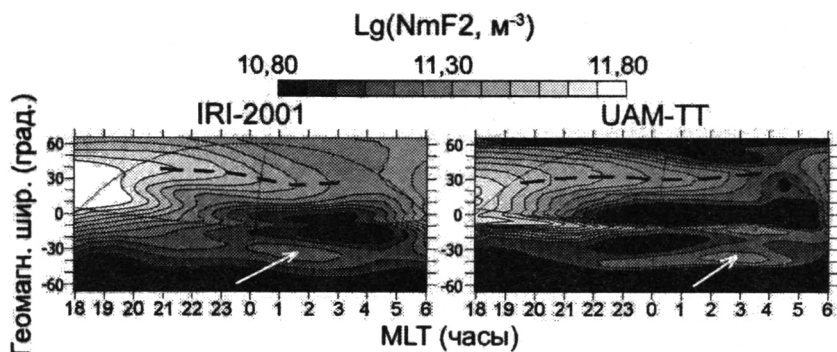


Рис. 1. Рассчитанные по IRI-2001 и UAM-TT глобальные карты $Lg(NmF2)$ в ночном секторе MLT для условия солнцестояния (23.06.1986, 18:00 UT) при низкой солнечной активности. Пунктиром нанесены полуночный меридиан, линия терминатора и географический экватор. Стрелки указывают на зимние ОПЭК по типу «холма», штриховые линии – на летние ОПЭК по типу «хребта с понижающейся высотой».

южном геомагнитном полушарии IRI-2001 воспроизводит ОПЭК значительно хуже, чем в северном. Это, по-видимому, объясняется гораздо меньшим числом пунктов регулярных ионосферных наблюдений в южном полушарии по сравнению с северным.

В широтно-высотных распределениях электронной концентрации ОПЭК обоих типов протягиваются вверх по силовым линиям геомагнитного поля до высот плазмосферы, проникая в нее (рис. 2). Анализ численных результатов показывает, что эти области простираются в плазмосферу вплоть до 8000 км.

Сезонная вариация ОПЭК проявляется в типе формируемого ОПЭК (летнего – по типу «хребта», зимнего – по типу «холма») и асимметрии широтного положения этих областей и значений $NmF2$ в них.

Найдено наличие LT-вариации ОПЭК, смешанной с UT-эффектом (из-за несовпадения геомагнитной и географической осей Земли) и сезонной вариаций, проявляющейся в смещении этих областей по геомагнитной широте при переходе от вечерних часов к утренним (возможны смещения как на более низкие широты, так и на более высокие).

Влияние солнечной активности на ОПЭК проявляется в том, что: 1) при высокой солнечной активности значения $NmF2$ в ОПЭК выше, чем при низкой; 2) в зимних условиях при низкой солнечной активности ОПЭК выражены отчетливее,

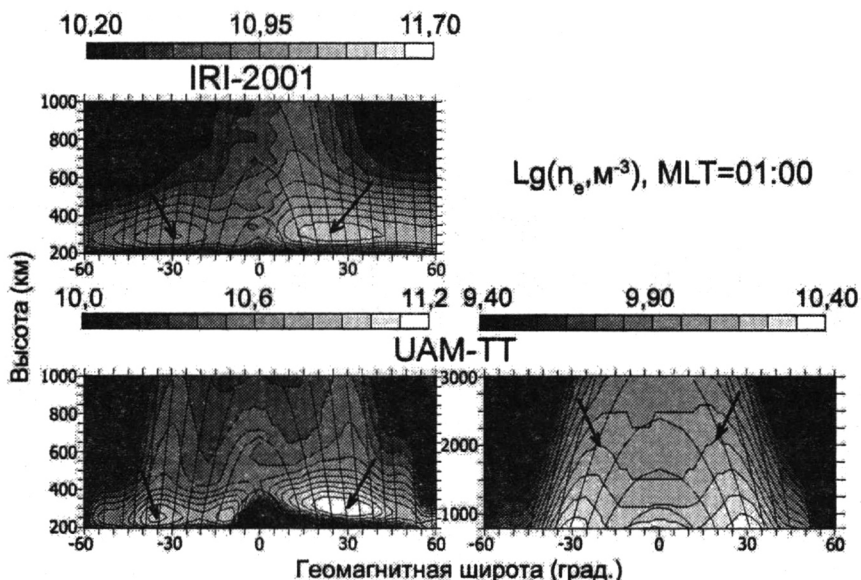


Рис. 2. Рассчитанные по IRI и UAM-TT широтно-высотные распределения $Lg(n_e)$ вдоль ночного меридиана $MLT=01:00$ для высот $h=200+800$ км (левый столбец) и высот $h=800+3000$ км (правый столбец) для условия солнцестояния (23.06.1986, 18:00 UT). Помимо изолиний $Lg(n_e)$ нанесены силовые линии геомагнитного поля. Стрелки указывают на ОПЭК.

чем при аналогичных условиях при высокой.

Зависимость ОПЭК от геомагнитной активности исследовалась на примере геомагнитных бурь 17-20 апреля 2002 года. Модельные расчеты проводились в двух вариантах: 1) UAM совместно с эмпирической моделью термосферы NRLMSISE-00 (UAM-MSIS) и 2) полностью самосогласованный вариант UAM-TT.

На основе анализа, полученных ночных меридиональных разрезов электронной концентрации установлено, что влияние геомагнитной активности на ОПЭК проявляется в уменьшении значений n_e в ОПЭК и высоты, до которой эти области простираются вдоль силовых линий геомагнитного поля, сопровождающееся сжатием их с полюсов во время отрицательных ионосферных бурь.

В четвертой главе представлены результаты исследования механизма формирования ночных ОПЭК в среднеширотной F2-области ионосферы и в плазмосфере Земли.

Для исследования влияния ветрового увлечения ионов и электромагнитного дрейфа плазмы на процесс формирования ОПЭК были проведены расчеты глобальных распределений электронной концентрации (n_e) по модели UAM-MSIS, в которых: 1) последовательно отключались нейтральный ветер и электромагнитный дрейф; 2) меридиональный ветер в ночном секторе MLT полагался направленным к экватору и постоянным (расчеты проводились для значений 0, 10, 50 и 100 м/с); 3) разность потенциалов поперек полярной шапки полагалась постоянной (20 и 60 кВ).

Для исследования влияния начальных условий на результаты моделирования процесса формирования ОПЭК были проведены расчеты глобальных распределений n_e по модели UAM-TT, стартовавшие от симметризованных широтно-однородных начальных условий, в которых полагались: 1) состав и температура нейтрального газа были рассчитаны по MSIS и симметризованы относительно геомагнитного экватора; 2) ионосфера и плазмосфера были опустошены. В ходе расчета глобальные распределения параметров термосферы не менялись, географическая и геомагнитная оси Земли были совмещены, термосферный ветер и электромагнитный дрейф отключены, интенсивности потоков выпадающих из магнитосферы энергичных электронов были равны нулю.

На основе анализа полученных глобальных карт распределений f_oF_2 , NmF_2 , TEC , меридионального ветра на высоте 300 км, зонального электрического поля на высоте 175 км, продольных (вдоль силовых линий геомагнитного поля) потоков ионов H^+ на высоте 1000 км и меридиональных разрезов n_e было установлено следующее.

1) Среднеширотные ОПЭК формируются только в вариантах расчетов с термосферным ветром (рис. 3, сплошные стрелки на двух верхних меридиональных разрезах n_e), без ветров эти области отсутствуют. На разрезах, полученных в расчетах без дрейфа, на субавроральных широтах формируются на субавроральных широтах $\sim 55^\circ$ области, подобные среднеширотным ОПЭК (рис. 3, пунктирные стрелки на двух правых разрезах). Аналогичный результат получен после первых суток интегрирования без учета дрейфа и ветра, стартовавших от широтно-неоднородных начальных условий (рис. 4, сплошные стрелки). То есть, в случае, когда плазмосфера в начальном состоянии опустошена, ее эффективность как источника поддержания ночной F2-области ионосферы максимальна на субавроральных широтах за счет особенностей геометрии силовых линий геомагнитного поля. Дальнейший процесс заполнения плазмосферы приводит к

16.04.2002

$Lg(n_e, \text{м}^{-3}), \text{MLT}=01:00$

UT=24:00

10,2 11,2 12,2

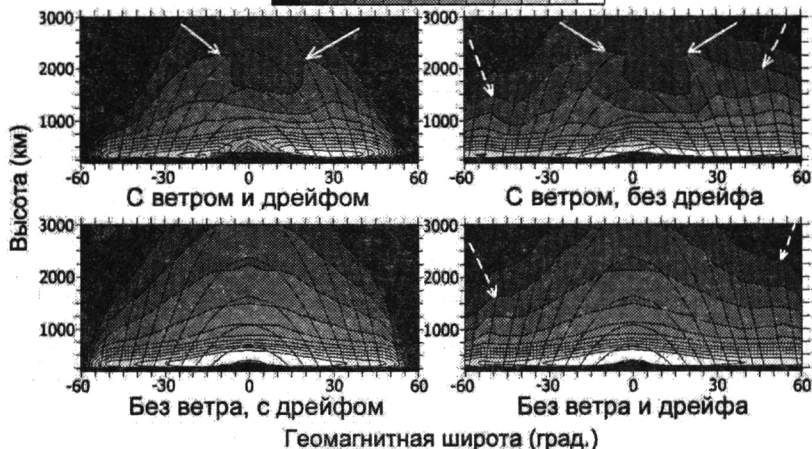


Рис. 3. Рассчитанные по UAM-MSIS широтно-высотные распределения $Lg(n_e)$ вдоль ночного меридиана $\text{MLT}=01:00$ для высот $h=200+3000$ км для 24:00 UT 16.04.2002. Помимо изолиний $Lg(n_e)$ нанесены силовые линии геомагнитного поля.

развитию среднеширотных ОПЭК на геомагнитных широтах $\sim 40^\circ$ (рис. 4, пунктирные стрелки на правом разрезе). То есть, по мере заполнения плазмосферы максимум ее эффективности смещается на средние широты. Учет ветрового увлечения ионов вдоль в ночные часы усиливает степень выраженности среднеширотных ОПЭК в широтном ходе n_e и определяет их долготную и LT- вариации.

2) Горизонтальная составляющая ветрового увлечения ионов совместно с потоками плазмы из плазмосферы перераспределяет ОПЭК, смещая их по широте относительно максимума вертикальной составляющей ветрового увлечения ионов.

3) Электромагнитный дрейф определяет положение и крутизну высокоширотной и приэкваториальной «стенок» ОПЭК. Высокоширотную стенку он смещает к экватору пропорционально величине электрического поля магнитосферного происхождения, за счет смещения на более низкие широты главного ионосферного провала, приводя к исчезновению субавроральных ОПЭК. На низких широтах в ночное время электрическое поле динамо-происхождения разрушает экваториальную аномалию, заполняя провал над геомагнитным экватором и оказы-

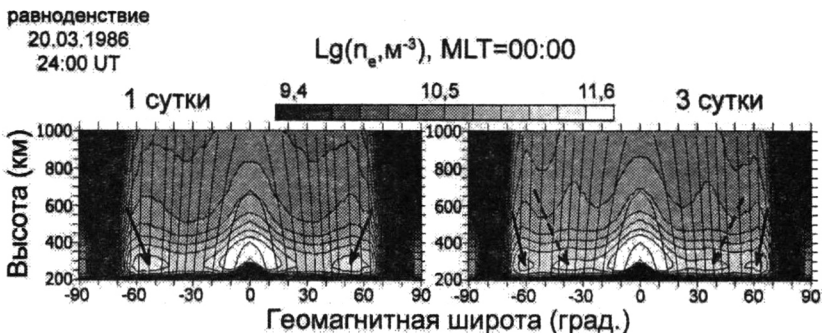


Рис. 4. Рассчитанные по UAM-TT широтно-высотные распределения $Lg(n_e)$ вдоль ночного меридиана $\text{MLT}=00:00$ для высот $h=200+1000$ км для 24:00 UT 20.03.1986. Помимо изолиний $Lg(n_e)$ нанесены силовые линии геомагнитного поля.

вая тем самым влияние на приэкваториальные «стенки» ОПЭК.

Для исследования вариаций ОПЭК в зависимости от гелио-геофизических условий были проведены расчеты для отобранных восьми дат, относящихся к спокойным геомагнитным условиям и представляющих четыре сезона при высокой и низкой солнечной активности по различным версиям модели UAM: 1) самосогласованной версии UAM; 2) UAM с MSIS; 3) UAM с MSIS и HWM. Для исследования влияния геомагнитной активности на ОПЭК рассматривались модельные расчеты для периода геомагнитных бурь 17-20 апреля 2002 года, описанные в главе 3. Все варианты модельных расчетов отличаются способом вычисления скорости термосферного ветра и состава нейтрального газа.

Установлено, что вариации ОПЭК в зависимости от сезона и солнечной активности обусловлены соответствующими вариациями меридиональной составляющей термосферного ветра. Влияние геомагнитной активности на ОПЭК обусловлено изменением состава нейтральной атмосферы во время возмущений, а влияние усиления меридионального ветра в эти периоды не значительно.

В **Заключении** приведены основные результаты, полученные в диссертации.

- 1) В широтно-долготном распределении максимальной электронной концентрации в F2-области ионосферы различаются два типа ночных областей повышенной электронной концентрации (ОПЭК): с максимумами в суточной и широтной вариациях в зимних условиях и с максимумом только в широтной вариации в летних условиях. В широтно-высотном распределении электронной кон-

центрации эти области протягиваются по силовым линиям геомагнитного поля в плазмосферу.

- 2) Механизм формирования ОПЭК основан на влиянии неоднородных по широте потоков плазмы из плазмосферы и ветрового увлечения ионосферной плазмы термосферным ветром вдоль силовых линий геомагнитного поля. Вертикальная составляющая ветрового увлечения ионов в случае ветра, направленного к экватору, приводит к переносу плазмы на большие высоты, где медленнее протекают процессы ее химических потерь. Горизонтальная составляющая совместно с потоками плазмы из плазмосферы перераспределяет ОПЭК, смещая их по широте относительно максимума вертикальной составляющей ветрового увлечения ионов.
- 3) Электромагнитный дрейф влияет только на положение и крутизну высокоширотной, примыкающей к главному ионосферному провалу, и приэкваториальной, примыкающей к остаткам экваториальной аномалии на ночной стороне, «стенок» ОПЭК.
- 4) Вариации ОПЭК (сезонные и в цикле солнечной активности) объясняются соответствующими вариациями термосферных ветров на высотах F2-области ионосферы. Влияние геомагнитной активности на ОПЭК обусловлено изменениями термосферного состава.
- 5) ОПЭК воспроизводятся всеми версиями теоретической модели UAM и эмпирической моделью ионосферы IRI-2001 для всех сезонов и при различной солнечной активности. Наилучшее согласие между всеми вариантами расчетов наблюдается для условий летнего солнцестояния в северном полушарии при низкой солнечной активности.

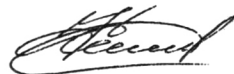
Исследования были поддержаны грантами РФФИ: 02-05-64141-а, 05-05-97511-р_север_а.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Князева М.А., Намгаладзе А.А. Математическое моделирование формирования ночных повышений электронной концентрации в F2-области спокойной среднеширотной ионосферы и в плазмосфере Земли // Вестник МГТУ. 2005. Т. 8. No. 1. С.144–155.
2. Намгаладзе А.А., Мартыненко О.В., Зубова Ю.В., Доронина Е.Н., Князева М.А., Намгаладзе А.Н. Математическое моделирование эффектов геомагнитных бурь 17-20 апреля 2002 года в верхней атмосфере Земли // Материалы Всероссийской научно-технической конференции "Наука и образование-

- 2003". 2003. Ч. V. МГТУ. Мурманск. С. 74.
3. Князева М.А. Плазмосферные эффекты геомагнитных бурь 17–20 апреля 2002 года // Материалы Всероссийской научно-технической конференции "Наука и образование-2003". 2003. Ч. V. МГТУ. Мурманск. С. 78.
 4. Namgaladze A.A., Namgaladze A.N., Martynenko O.V., Doronina E.N., Knyazeva M.A., Zubova Yu.V. Numerical modeling of the thermosphere, ionosphere and plasmasphere behaviour during the April 2002 magnetic storms // Physics of Auroral Phenomena, Proceedings of the XXVI Annual Apatity Seminar. 2003. Preprint PGI. P. 74–78.
 5. Князева М.А., Намгаладзе А.А. Анализ роли термосферных ветров и электромагнитных дрейфов в формировании ночных среднеширотных максимумов электронной концентрации в спокойной F2-области ионосферы // Материалы Международной научно-технической конференции "Наука и образование-2004". 2004. Ч.5. МГТУ. Мурманск. С. 22–24.
 6. Князева М.А., Намгаладзе А.А. Математическое моделирование влияния электромагнитного дрейфа на форму ночных повышений электронной концентрации в F2-области спокойной среднеширотной ионосферы и в плазмосфере Земли // Материалы Международной научно-технической конференции "Наука и образование-2005". 2005. МГТУ. Мурманск. Ч. 5. С. 67–70.
 7. Князева М.А., Намгаладзе А.А. О зависимости областей повышенной электронной концентрации в спокойной области F2 ионосферы от сезона и уровня солнечной активности // Материалы Международной научно-технической конференции "Наука и образование-2006". 2006. МГТУ. Мурманск. С. 360–363. [НТЦ «Информрегистр» № 0320501517, св. 7081 от 28.11.05г. Электронный ресурс. 6,5. 1 опт. компакт-диск (CD-ROM)].
 8. Knyazeva M.A., Namgaladze A.A. An influence of the thermospheric wind variations on the enhanced electron density regions in the night-time ionospheric F2-layer and in the plasmasphere // Proc. 6th International Conference "Problems of Geocosmos". 2006. Saint-Petersburg State University. P. 91–94.
 9. Мартыненко О.В., Князева М.А. Развитие модели UAM посредством подключения к ней ряда эмпирических моделей по технологии метамодели // Материалы Международной научно-технической конференции "Наука и образование-2007". 2007. МГТУ. Мурманск. С. 351–353. [НТЦ «Информрегистр» № 0320700491, от 05.03.07 г. Электронный ресурс. 1 опт. компакт-диск (CD-ROM)].

10. Knyazeva M.A., Namgaladze A.A. A model study of the seasonal and solar activity variations of the enhanced electron density regions in the night-time ionospheric F2-layer and plasmasphere // *Physics of Auroral Phenomena, Proc. XXIX Annual Seminar*. 2007. Apatity. Kola Science Centre. Russian Academy of Science. P. 225–228.
11. Князева М.А., Намгаладзе А.А. Влияние меридионального ветра на широтное положение областей повышенной электронной концентрации в ночной F2-области ионосферы // *Материалы Международной научно-технической конференции "Наука и образование-2008"*. 2008. МГТУ. Мурманск. С. 223–226. [НТЦ «Информрегистр» № 0320800238 от 21.01.08г. Электронный ресурс. 1 опт. компакт-диск (CD-ROM)].
12. Martynenko O.V., Knyazeva M.A. Model integration in the Framework Atmosphere Model (FrAM) // *Physics of Auroral Phenomena, Proc. XXXI Annual Seminar*. 2008. Apatity. Kola Science Centre. Russian Academy of Science. P. 157–159.
13. Knyazeva M.A., Namgaladze A.A. An investigation of the night-time increases of the plasma density in the middle-latitude ionospheric F2-layer by the mathematical modeling method // *Physics of Auroral Phenomena, Proc. XXXI Annual Seminar*. 2008. Apatity. Kola Science Centre. Russian Academy of Science. P. 145–148.
14. Knyazeva M.A., Namgaladze A.A. An influence of the meridional wind on the latitudinal location of the enhanced electron density regions in the night-time ionospheric F2-layer and plasmasphere of the Earth // *Proc. of the 7th International Conference "Problems of Geocosmos"*. 2008. Saint-Petersburg State University. P. 129–133.
15. Князева М.А., Намгаладзе А.А. Математическое моделирование трехмерной топологии областей повышенной электронной концентрации в ночной среднеширотной F2-области ионосферы // *Материалы Международной научно-технической конференции "Наука и образование-2009"*. 2009. МГТУ. Мурманск. С. 222–226. [НТЦ «Информрегистр» № 0320900170. Электронный ресурс. 1 опт. компакт-диск (CD-ROM)].
16. Князева М.А., Намгаладзе А.А., Мартыненко О.В. Эффективность плазмосферы как источника поддержания ночной F2-области ионосферы // *Материалы Международной научно-технической конференции "Наука и образование-2009"*. 2009. МГТУ. Мурманск. С. 227–230. [НТЦ «Информрегистр» № 0320900170. Электронный ресурс. 1 опт. компакт-диск (CD-ROM)].



10²

Подписано в печать 03.07.2009. Формат 60х84/16. Печ. л. 0,5.
Заказ 3202. Печать офсетная. Тираж 100 экз.
Отпечатано с готового оригинал-макета
Типография ООО «ТРОВАНТ». ЛР № 071961 от 01.09.99.
142191, г. Троицк Московской обл., м-н «В», д.52.
Тел. (495) 775-43-35, (4967) 51-09-67, 50-21-81